

不規則波による碎波帯内定常流速と長周期成分の鉛直分布

岡 安 章 夫*・片 山 裕 之**・古 永 充***

1. はじめに

碎波帯における漂砂や物質拡散を定量的に評価するためには、碎波帯内の岸沖定常流である戻り流れの精度よい予測が必要である。近年、規則波による室内実験において、碎波帯内の流速場に関する詳細な測定が行われ（例えば Stive・Wind, 1982; 灘岡ら, 1985; 岡安ら, 1986）、また、これらの実測値をもとに戻り流れを推算する方法として、Svendsen(1984)、灘岡・広瀬(1986)、岡安ら(1989)、山下ら(1989)、平山(1990)のモデルなどが提案されている。これらの規則波に関する研究では、碎波点あるいは突っ込み点において波の性質や流速場の構造が大きく変化し、これに伴い質量輸送量や定常流の鉛直分布も碎波点前後で大きく異なることが指摘されている。従って、上記のモデルもまた、これらの流速場の特徴を精度良く再現することを一つの目標としている。

しかし、現地での波浪が不規則であることを考慮すれば、戻り流れについても不規則波での流速測定と、それをもとにした戻り流れのモデル化が不可欠となる。不規則波浪場においては、個々の波で碎波点が異なるため流速場が全体として平滑化される傾向にあり、碎波点前後の変化も規則波ほど著しくないと考えられる。不規則波による碎波帯内の流速を測定した例には、室内実験において底面付近の流速測定を行った佐藤ら(1987, 1988)などの研究がある。また、磯部ら(1983)は、現地波浪について碎波帯内外の岸沖方向の流速を測定し、岸沖定常流の鉛直分布についても検討しているが、測定点がそれほど密に配置されていないため分布特性については明確にしていない。

そこで本研究では、まず室内実験において、一様勾配斜面上およびバー型地形での不規則波について、レーザ・ドブラー流速計を用い、碎波帯内のトロフレベルより下での流速を測定した。得られた流速データをもとに、規則波によるものと比較し、戻り流れの二次元分布につい

て考察した。さらに、規則波に対する戻り流れの推算モデルを用いて、沖波の波高分布から不規則波浪場での戻り流れの分布を予測する方法について検討した。また、碎波帯内の流速変動の長周期成分についてもその鉛直分布の特性について考察を加えた。

2. 実験方法およびデータ処理

実験には、長さ 17 m、幅 0.5 m、深さ 0.55 m の二次元波動水槽を用いた。この水槽の一端には反射波を吸収制御できる不規則波造波装置が備えられており、他端にステンレス板で 1/20 一様勾配と、1/20 勾配斜面を組み合わせたバー型の二通りの地形を作成し設置した。バー型地形については、斜面先端から 5 m が 1/20 勾配、続く 1 m が -1/20、最後の 4 m が再び 1/20 勾配である。バー型地形の概要を図-1 に示す。

一様勾配における実験条件は、規則波と不規則波それぞれによる碎波帯内流速の比較検討をする目的で、1 種類の規則波（ケース 1）と Bretschneider・光易型のスペクトルを有し、この規則波の波高・周期にほぼ等しい有義波高・有義波周期を持つ不規則波（ケース 2）とした。また、バー型地形には有義波高・有義波周期の異なる 2 種類の不規則波（ケース 3 および 4）を作用させ測定を行った。一様水深部の水深 h_0 は、一様勾配の場合で 35 cm、バー型の場合で 32 cm、また、バー頂部での水深は 7 cm である。実験条件を表-1 に示す。ここで、 T は周期、 H_0 は一様水深部での波高であり、不規則波に対してはゼロダウncross法による有義波の諸元で示してある。

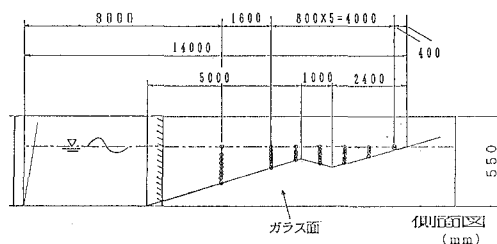


図-1 実験地形の概要（バー型）

* 正 会 員 工 博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

** 学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究科

*** (株)間組

表-1 実験条件

ケース	地 形	$h_s(\text{cm})$	$T(\text{s})$	$H_s(\text{cm})$	備 考
1	一様勾配	35.0	1.20	7.85	規則波
2	一様勾配	35.0	1.26	8.28	不規則波
3	バー型	32.0	0.945	5.67	不規則波
4	バー型	32.0	1.14	7.52	不規則波

それぞれのケースについて、砕波帯内に 60 cm ないしは 160 cm 間隔で 7 つの測線を設け、最も沖側を測線 1、岸側を測線 7 とした。これらの測線は、砕波帯のほぼ全域をカバーするように砕波点付近から静水汀線付近にわたり配置したが、規則波(ケース 1)の場合、最も沖側の測線 1 は砕波点よりかなり沖に位置している。各々の測線上に、底面上 2 mm から平均水位付近まで 3~40 mm 間隔に測定点を配置した。また、測定点から水槽側面までの距離は 16 cm で、測定点の総数は一様勾配の場合で 49、バー型地形で 53 である。これらの各測定点において、岸沖方向の流速変動をレーザ・ドブラー流速計(15 mW He-Ne, 前方散乱型)で測定すると同時に、容量式波高計で水位変動を記録した。また、座標軸は、静水汀線を基準として岸方向に x 軸を、静水位から鉛直上向きに z 軸を設定した。

測定した流速変動および水位変動のデータはサンプリング周波数 50 Hz で A/D 変換を行いデジタルデータレコーダに記録し、その後の解析に用いた。規則波(ケース 1)については 100 周期分を記録し、得られた流速データから位相平均流速を求め、さらにこれを一周期間にわたり平均することにより定常流速を求めた。記録された流速計からの電圧値を流速に変換する際には、同一の流速に対する流速計の微小な出力変動(ドリフト)が定常流速測定の精度に大きく影響する。そこで、一測点毎に静水状態での流速計の出力を記録し、これを用いて測定された流速の校正を行った。

また、不規則波については、造波開始後 3 分を経過した時点で波浪場がほぼ定常に達したとみなし、その後の 5 分間のデータを解析に用いた。ただし、ケース 2 につ

いては 3 分間のデータを用いた。測定にあたり、できるだけ条件を揃えるため、造波信号は各測点に対して同じものを繰り返して用いた。また、各測定における時刻の基準は、一様水深部に設置された波高計からの水位変動データを用いて決定した。

3. 実験結果

不規則波における水位変動 η 、流速変動 u は、周波数 f により、定常成分 $\bar{\eta}$, U 、長周期変動成分 η_L , u_L 、波動成分 η_w , u_w 、乱れ成分 η_t , u_t に分けて考えることができる。本研究では、長周期変動成分を $f < 0.3(\text{Hz})$ 、波動成分を $0.3 \leq f < 5(\text{Hz})$ 、乱れ成分を $5 \leq f(\text{Hz})$ と定義し、測定された水位変動および流速変動から、数置フィルターを用いてこれらの成分を分離した。

3.1 戻り流れの 2 次元分布

図-2 は一様勾配上の規則波と不規則波による戻り流れの 2 次元分布を同一の図に示したものである。図中の b.p. は規則波による砕波点を示し、b.p._{1/3} は不規則波による有義砕波点を示している。砕波点は波高もしくは有義波高が最大となった測線を示しているの、表示されている砕波点には若干の誤差が含まれる。また、平均水位は規則波によるものを示してある。

図-2 より、規則波では砕波点付近(図中 $x = -240 \sim -180$)で鉛直分布の形状が急激に変化したが、不規則波によるものではこの変化が穏やかであることが分かる。これは、不規則波では個々の波で砕波点が変わるためと考えられる。また、この分布形状が変化する点は、規則波では突っ込み点付近となっているが、不規則波では有義砕波点で既に砕波帯岸側での形状に近い分布を示しており、波高の大きい波による流速の影響を無視することができないことを示していると考えられる。また、ほぼ全ての波が砕波する測線 5 以降では、規則波と不規則波による戻り流れの分布形状に顕著な差異はみられない。断面平均値については、不規則波によるものは規則波と比較して、砕波帯の全域にわたって 10 数%から 30 数%小さくなっている。

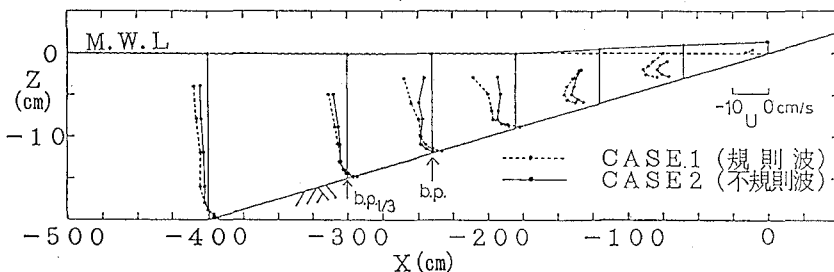


図-2 一様勾配斜面上での規則波と不規則波による戻り流れの 2 次元分布

バー型の地形において測定された戻り流れの分布を示したのが図-3である。図中の平均水位はケース4のものを、また、クレストレベル、トロフレベルは1/3最大波によるものの平均値を示している。バー型においては、バー頂部の岸側で、定常流速が底面付近で沖側に大きな値を示す inner region に特徴的な分布形状を示すようになるが、その後、波の再生に伴い、再び碎波帯外に近い形状になる。底面近傍の流速も、バー頂部岸側で一度沖向きとなるが、再生域で再び岸向きとなり、底面波動境界層が発達することが分る。

3.2 長周期流速成分の2次元分布

図-4に一樣勾配斜面における長周期流速成分 u_l の

根二乗平均値 $u_{l\text{rms}}$ の二次元分布を示す。図-5はバー型地形における $u_{l\text{rms}}$ の分布である。いずれの場合も $u_{l\text{rms}}$ の値は鉛直方向にほぼ一定であり、波動流速の分布形状に近く、底面から1cm程度で極大になるところがあり、それより下では急激に減少している。これは境界層の影響であると考えられるが、碎波により乱れが上方から供給されることを考慮すれば、一般の乱流境界層とも異なる取扱いが必要となると考えられる。

バー型における長周期変動成分の断面平均値 u_{lm} の岸沖方向変化を示したのが図-6である。長周期変動量はバー頂部で極大となった後、水深の増加に伴い再生部で若干減少し、二次碎波後に急激に増大する。

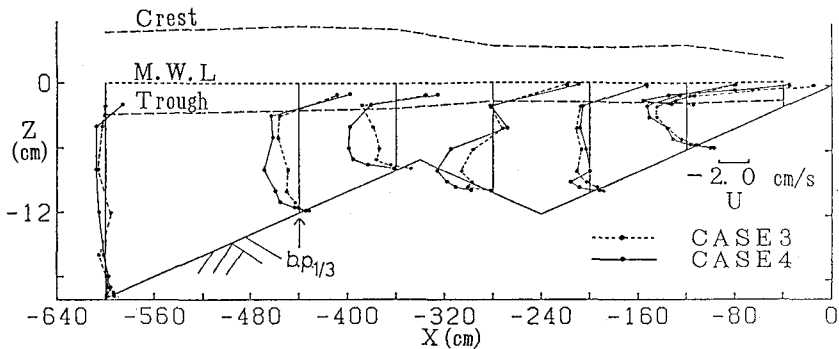


図-3 バー型地形上での不規則波による戻り流れの2次元分布

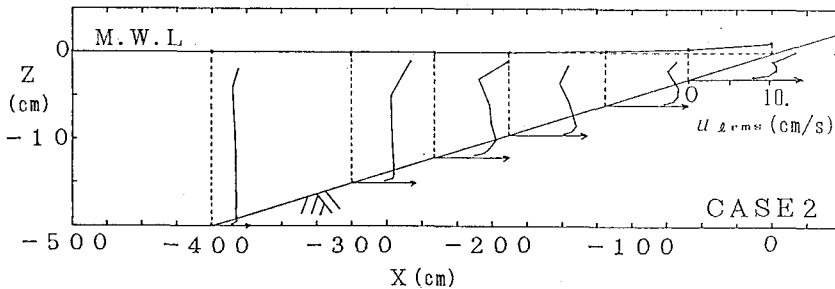


図-4 一樣勾配斜面上での長周期変動流速成分の2次元分布

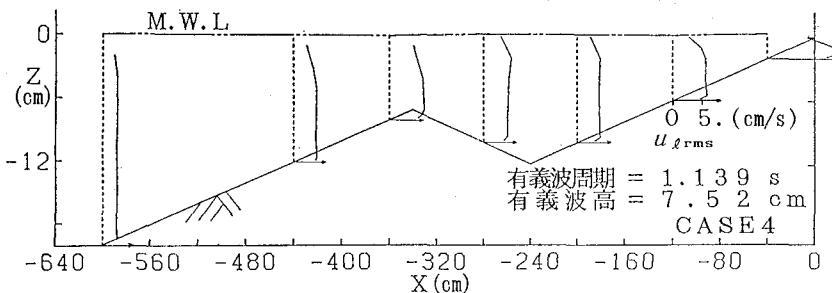


図-5 バー型地形上での長周期変動流速成分の2次元分布

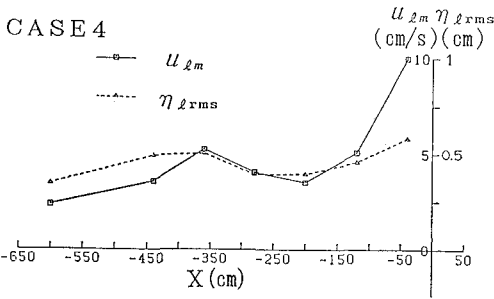


図-6 パー型地形上での長周期変動流速成分の断面平均値の岸沖方向変化

4. 不規則波による砕波帯内定常流速のモデル化

不規則波では砕波点が各波ごとに異なるため、3.1 節の結果からも明らかのように、定常流速分布も対応する規則波に比べて岸沖方向の変化が穏やかになる傾向にある。従って、従来の規則波による定常流速場を対象とした推算モデルを用いた場合、特に、砕波点付近で予測の精度が大幅に落ちることが予想される。そこで、本研究では、沖波の波高分布からそれぞれの波高に対応する規則波の戻り流れを計算し、これらを重ねあわせることにより不規則波による戻り流れを推算する方法について検

討した。

不規則波による定常流速を推算する方法としてゼロダウクロス法による波別解析を用いる場合、まず、個々の波に相当する規則波による定常流速を計算し、これを重ねあわせることが考えられる。しかし、この方法によると波の数が多い場合に、計算時間が非常に長くなり現実的ではない。そこで、本研究では、波別解析法により求められた各種の代表波高を用いることとした。具体的には、まず、波別解析により求められた個々の波の波高を大きい順にならべ変え、大きい方から総数の 1/10, 7/30, 2/3 の 3 つに区別し、各々に区分される波の波高平均を求める。この平均値をそれぞれ H_1 , H_2 , H_3 とすると、これらの値は、1/10 最大波高 $H_{1/10}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均波高 $\bar{H}$ を用いて、

$$H_1 = H_{1/10}$$

$$H_2 = \frac{10H_{1/3} - 3H_{1/10}}{7} = 1.429H_{1/3} - 0.429H_{1/10}$$

$$H_3 = \frac{3\bar{H} - H_{1/3}}{2} = 1.5\bar{H} - 0.5H_{1/3}$$

で与えられる。次に、これらの値に相当する波高を持つ規則波による戻り流れを、岡安ら (1989) のモデルを用いて計算し、求められた値にそれぞれに区分される波の出現確率 1/10, 7/30, 2/3 を乗じて加え合せ、不規則波による戻り流れを評価した。計算に際して周期は、一律

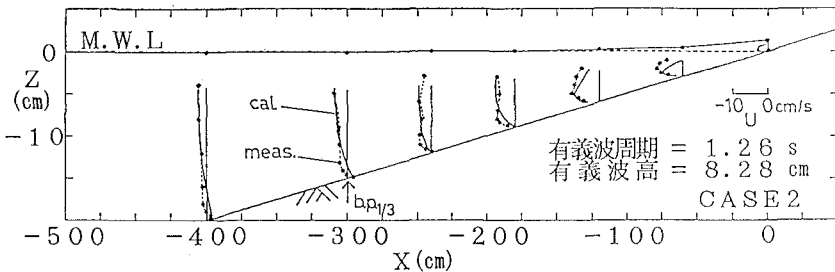


図-7 不規則波による戻り流れの計算値と実測値の比較 (一様勾配)

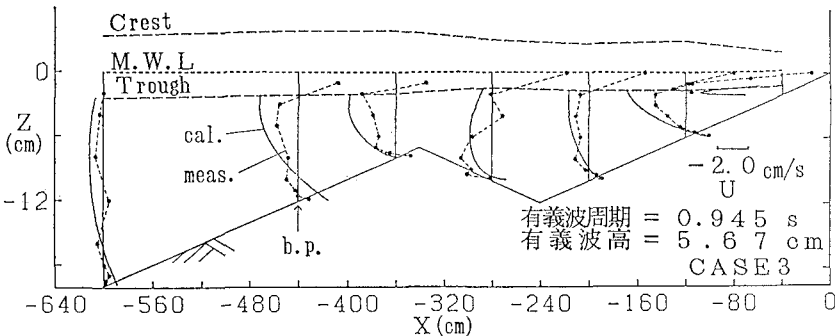


図-8 不規則波による戻り流れの計算値と実測値の比較 (パー型)

に有義波周期 $T_{1/3}$ を用いた。

一様勾配に対する計算値を実測値と共に 図-7 に、バー型地形に対するものを 図-8 に示す。有義碎波点付近で岸沖方向に徐々に分布形状が変化する様子が良く再現されている。バー型の場合には、再生領域についても、計算値と実測値の一致度は良く、特に底面付近での岸向き流速が精度良く評価されている。

5. おわりに

本研究では、室内実験において、一様勾配斜面上およびバー型地形上での不規則波について碎波帯内の流速を測定し、戻り流れの二次元分布について考察した。さらに、規則波に対する戻り流れの推算モデルを用いて、波別解析法による沖波の波高分布から不規則波浪場での戻り流れの分布を予測する方法について検討した。また、碎波帯内の流速変動の長周期成分についてもその鉛直分布の特性について検討した。以下に本研究で得られた主な結論を示す。

1) 不規則波による碎波帯内の岸沖定常流速場を規則波と比較した場合、碎波点付近での鉛直分布の形状の変化が穏やかである。断面平均の定常流の大きさも規則波に比べてかなり小さくなる。

2) 不規則波による岸沖方向流速変動の長周期成分は鉛直方向には水深によらずほぼ一定の値であるが、底面付近では境界層の影響が顕著に現われる。

3) 不規則波による戻り流れは、波高分布から沖波を3つに区分し、それぞれに区分される波の平均波高に対して規則波に対する推算モデルを適用し、頻度に応じて重ね合わせることによって評価することができる。

今後、現地波浪によるものも含めたより多くの実測デ

ータを蓄積すると共に、定常流速だけでなく、長周期変動流速や波動流速も取り扱える推算モデルを開発することが望まれる。

なお、本研究は文部省科学研究費奨励A(No. 03750431、代表者 岡安章夫) による研究であることを付記する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・水口 優・堀川清司 (1980): 碎波帯付近の波にと
もなう流速場に関する現地観測, 第 27 回海岸工学講演会論
文集, pp. 148-152.
- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司 (1987): 碎波帯内定常流速場
の鉛直分布に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集,
pp. 31-35.
- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 碎波帯におけるエネ
ルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第
36 巻, pp. 31-35.
- 佐藤慎司・福濱方哉・堀川清司 (1987): 斜面上における不
規則波の碎波変形と底面流速に関する実験的研究, 第 34 回海
岸工学講演会論文集, pp. 36-40.
- 佐藤慎司・諫山太郎・柴山知也 (1988): 緩勾配斜面上にお
ける不規則波の底面流速変動特性に関する研究, 第 35 回海岸
工学講演会論文集, pp. 78-82.
- 灘岡和夫・小谷野喜二・日野幹雄 (1985): 二成分光ファイバ
ー流速計を用いた碎波帯内流速場の特性の解明, 第 32 回海
岸工学講演会論文集, pp. 50-54.
- 灘岡和夫・広瀬文人 (1986): 碎波の物理過程に基づいた碎波
帯内の拡散係数のモデル化, 第 33 回海岸工学講演会論文集,
pp. 26-30.
- 平山秀夫 (1990): 碎波帯内における質量輸送 (戻り流れ) の鉛
直分布に関する研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 41-45.
- 山下隆男・Dadang Ahmad S.・宍倉知広・土屋義人 (1989):
鉛直 2 次元海浜流モデル, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.
244-248.
- Stive, M. J. F. and H. G. Wind (1982): A study of radiation
stress and set-up in the near-shore region, Coastal Eng.,
Vol. 6, pp. 1-25.
- Svendsen, I. A. (1984): Mass flux and undertow in a surf
zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347-365.